

· 成果简介 ·

视觉图像信息处理神经机制研究的新进展

李朝义

(中国科学院上海生理研究所感觉信息处理研究室, 中国科学院生物物理研究所
视觉信息处理开放实验室, 上海 200031)

[关键词] 视觉, 神经元, 感受野, 图像处理, 空间总和

每一个视觉神经元只对视野中某特定区域内的刺激产生反应, 这个区域称为该神经元的感受野。近 30 年来, 通过研究各级神经元感受野的结构和功能, 视觉神经科学已取得了一系列突破性进展。但是, 由于感受野的面积很小, 传统的感受野理论在解释大范围复杂图像信息处理方面有很大局限性。鉴于这种情况, 视觉科学家们开始把注意力转移到研究传统感受野以外区域的作用。

最近十多年中, 我们系统地研究了视觉系统各级神经元的感受野外区域的结构和功能, 以及它们在处理视觉信息和形成视知觉中的作用。我们的工作表明, 在视网膜、外膝体和视皮层神经元的感受野外, 都存在着一个面积比传统感受野大数十倍的感受野外区, 它们具有抑制、易化和去抑制等不同性质和不同形式的空间结构, 在复杂图像信息处理中起着不同的作用。本文将简要地报告我们实验室在感受野外区域研究方面所取得的进展。

1 视网膜和外膝体神经元的感受野外区 (去抑制区)

通过测量视觉神经元的面积-反应特性, 我们^[1,2]观察到, 在猫视网膜节细胞和外膝体神经元的感受野外, 都存在着一个大范围的 (直径可达 15 度以上) 去抑制区 (disinhibitory region, 以下简称 DIR)。用大面积光斑同时刺激感受野和 DIR, 可在一定程度上解除感受野外周区对中心的抑制作用。当用离散点刺激 DIR 时, 随着刺激像点离散程度的增加, 去抑制作用逐渐减弱 (反应增强)^[1,3]。这个结果揭示了产生去抑制过程的神经机制: 在一个大的外周抑制区内, 相邻亚区之间存在着相互抑制, 这种相互作用愈强, 去抑制作用也愈明显^[3]。我们用侧抑制的数学模型模拟了这种相互作用^[4], 这个新的感受野模型可以很好地模拟视觉神经元的各类面积-反应特性, 同时也能模拟反应强度与像点离散度的关系, 因此具备了一定程度的图形自适应特性^[5]。

2 DIR 在处理亮度和颜色信息中的作用

自然界中的各种图像都是由不同的亮度和颜色对比构成的。对比有两种形式: (1) 边缘

国家自然科学基金重大和重点项目。

本文于 1996 年 7 月 9 日收到。

对比 (Mach 型对比); (2) 区域对比 (Hering 型对比)。传统的感受野理论只能说明边缘对比的神经机制, 关于区域对比的神经机制一直没有得到解决。

我们用一种图形扫描的方法研究了 DIR 在传递图像区域亮度对比中的作用^[6]。刺激图形是一幅真实的乒乓球照片, 此照片中包含有不同的图像成分: 尖锐的明暗对比边缘、大面积的亮区和暗区以及逐渐变化的亮度梯度。将这幅图像投射在刺激屏幕上, 通过机械转镜使该图像对一个神经元的感受野及其 DIR 进行扫描。与此同时, 用计算机将神经元对每个局部的反应 (脉冲频率) 转换成不同的灰度, 由此得出神经元的传递图形。结果表明, 在单独感受野中心的传递图形中, 原图的明暗对比边缘变得模糊; 在中心区和外周区共同传递的图像中, 由于两个区的相互拮抗, 图形的边缘信息 (Mach 型对比) 得到了增强, 但同时却又造成原图像中区域亮度对比 (Hering 型对比) 和亮度梯度信息 (低空间频率信息) 的丢失; 这时, 若在感受野外再加入 DIR 的作用, 就可以看到被滤除的低空间频率信息得到了很大程度的恢复, 同时却完全不减弱拮抗区的边缘增强作用。由此可见, 去抑制区的作用之一是补偿由于感受野中心-外周拮抗机制所造成的低空间频率成分的损失, 起到了传递图像区域亮度对比和亮度梯度信息的作用。

我们用色觉与人十分相似的猕猴研究了 DIR 在处理颜色信息中的作用^[7]。在猴的外膝体记录单个神经元的放电, 用不同波长的光线测试了改变 DIR 刺激光颜色对外膝体细胞光谱选择性的影响。我们观察到, 当照射 DIR 的光线具有与该细胞敏感色相同的波长时, 其放电受到压抑, 并且敏感波段变窄; 而当照射 DIR 的光线具有与该细胞敏感色相拮抗的波长时, 细胞反应得到增强, 并且敏感波段变宽。由此可见, DIR 与感受野之间的这种颜色相互作用可能是产生色觉恒定性和颜色对比等心理现象的神经基础。所谓色觉恒定性, 是指视觉系统可以在周围环境光谱成分出现明显变化的情况下 (例如早晨的日光光谱偏红, 中午日光光谱偏蓝), 保持对物体颜色的认知相对不变。上面的实验正好说明, 当周围环境光线趋红时, 外膝体神经元能自动地降低对红光的敏感性, 提高对蓝光的敏感性, 反之亦然。从而保持了颜色知觉不变。

3 视皮层神经元的感受野外区 (整合野)

我们最近的工作表明, 在视皮层 17 区^[8]和 18 区 (Li CY & Lei JJ, 1996) 神经元的传统感受野外面, 也都存在着一个对细胞反应起调制作用的大区域, 我们把这个区域命名为“整合野” (integration field, 以下简称 IT)。皮层神经元的 IT 同其传统感受野一样, 具有选择图形方位、空间频率、运动方向和运动速度的特性。这个结果把视皮层神经元接受特征信息输入的有效空间范围扩大了数十倍, 为视皮层神经元整合大范围图形特征的神经机制提供了可能的解释。IT 具有抑制、易化和去抑制等不同性质和几种不同的空间结构类型。每一种特性和结构类型在整合不同形式的复杂图像信息中起着不同的作用^[9]。

在研究视皮层神经元的 IT 特性时, 我们用一个中心光栅来刺激该神经元的感受野, 使细胞活动维持在一个持续的发放水平, 同时用一个外周光栅来刺激其外面的 IT。这时, 改变外周光栅的各种刺激参数 (方位、运动方向、空间频率和运动速度), 即可测出 IT 的相应的特征调谐特性。对大多数细胞来说, IT 的这些调谐特性都与该细胞的感受野的调谐特性相似, 它们具有大致相同的形状和峰值位置。对于抑制型 IT 来说, 当 IT 内的图像特征与感受野内的

图像特征相似时，细胞的反应受到最强抑制；而当感受野内外的图像特征存在差异时，抑制作用减弱或消失（反应增强）。这一事实表明，IT的作用不只是一般地影响中心（感受野）的反应强度，而是同中心一起，组成一个特征检测单元，通过中心与外周的相互作用来检测图像的各种特征对比（texture contrast），从而为图形-背景的分离创造了必要的条件。

4 DIR 与 IT 的动态特性

长期以来，一直认为神经元感受野的大小是固定不变的，近年来这种观念出现了动摇。作者曾用观察到，在不同的背景图像作用下，猫外膝体神经元感受野的大小会发生很大的改变^[1,3]。另外，在运动背景下，随着运动速度的改变，感受野的大小也会发生相应的变化^[10]。感受野面积的扩大意味着原来的整合野变成了感受野的一部分。感受野与整合野之间的这种互变性说明，与单个神经元相联系的神经网络的突触性质（兴奋或抑制）是动态可变的。显然，这种动态特性具有极其重要的生理意义。例如，在昏暗的环境中，视觉神经元以降低空间分辨率为代价，将感受野变大，以利于通过空间总和来接受微弱光线。在需要分辨精细结构的情况下，感受野变小，以利于提高空间分辨能力。在感受运动目标时，感受野变大将赋予神经元以足够的时空域来辨别运动的方向和测量运动的速度。

5 IT 与视错觉

von der Heydt 等（1989）用一种产生边沿错觉的图形来刺激猴 V2 区的神经元，大约有 1/3 的细胞能对这种错觉边沿产生反应。实际上在他们的实验中，构成错觉边沿的图形成分只刺激到了感受野外区域，并没有触及感受野本身。Gilbert 和 Wiesel（1990）发现，用偏离最佳方位 20—30 度的背景光条刺激猫 17 区神经元的感受野外区域，可以使细胞的最佳方位发生 10 度左右的位移，他们认为，这种相互作用是产生倾斜错觉（tilt illusion）的基础。我们在研究猫 18 区神经元的速度调谐特性时观察到，当 IT 内的刺激图形以较低的速度移动时，皮层神经元的速度选择性会变快，相反，其速度选择性则向低速移动（Li CY & Lei JJ, 1996）。这些实验说明，边缘、方位和速度错觉的产生也与感受野外区域的作用有关。这些错觉的生理意义是增强（扩大）相邻区域间图形特征的差别。

6 结 语

颜色、图形和运动知觉等复杂视觉过程具有一个共同的特点，即对视野中某一局部特征的认知受周围图形特征影响。视觉的这种整合性质最明显不过地表现在一系列图形错觉中，例如方位错觉、大小错觉、速度错觉和颜色错觉等。从细胞水平上怎样解释这些大范围的图形相互作用？这一直是长期以来使视觉科学家们感到困扰的问题。面对这些问题，传统的感受野理论显得无能为力。感受野外区的发现及其结构和功能的了解，为阐明大范围复杂图形整合的神经机制提供了有力的理论基础。如果说前一时期的基于感受野特征分析的研究曾极大地推动了视觉科学的发展，那么，从目前趋势看，对大范围特征整合机制的研究将会成为新的热点，并把视觉神经科学推上一个新的高度。

参 考 文 献

- [1] Li C Y, He Z J. Effects of patterned backgrounds on responses of lateral geniculate neurons in cat. *Exp Brain Res*, 1987, **67**: 16—26.
- [2] Li C Y, Zhou Y X, Pei X et al. Extensive disinhibitory region beyond the classical receptive field of cat retinal ganglion cells. *Vision Res*, 1992, **32**: 219—228.
- [3] Li C Y. Mutual interactions and steady background effects within and beyond the classical receptive field of lateral geniculate neurones. In: Yew DT, So KF, Tsang DSC, editors. *Vision: Structure and Function*. World Scientific Publishing CO. Pte. Ltd., Singapore, 1988, 259—280.
- [4] 邱芳土, 李朝义. 同心圆感受野去抑制特性的数学模拟. *生物物理学报*, 1995, **11** (2): 214—220.
- [5] 李朝义, 邱芳土. 视网膜神经节细胞空间传输特性的模拟. *生物物理学报*, 1995, **11** (3): 395—400.
- [6] Li C Y, Pei X, Zhou Y X et al. Role of the extensive area outside the X-cell receptive field in brightness information transmission. *Vision Res*, 1991, **31**: 1529—1540.
- [7] Creutzfeldt OD, Li C Y, Pei X et al. The neurophysiological correlates of colour and brightness contrast in lateral geniculate neurons. I Population analysis. *Exp Brain Res*, 1991, **87**: 3—21.
- [8] Li C Y and Li W. Extensive integration field beyond the classical receptive field of cat's striate cortical neurons—classification and tuning properties. *Vision Res*, 1994, **34** (18): 2337—2355.
- [9] Li C Y. Unresponsive field beyond the classical receptive field—Organization and functional properties. *News In Physiological Sciences*. Volume 11, August, 181—187 (1996).
- [10] Li C Y, Nothdurft HC. Some observations on dynamic properties of receptive field organization of complex cells in cat visual cortex. *Scientia Sinica (Series B)*, 1987, **30**: 44—54.

NEW ADVANCES IN NEURONAL MECHANISMS OF IMAGE INFORMATION PROCESSING

Li Chaoyi

(Department of Sensory Information Processing, Shanghai Institute of Physiology, CAS; Laboratory of Visual Information Processing, Institute of Biophysics, CAS, Shanghai 200031)

Key words vision, neuron, receptive field, image processing, spatial summation